

На правах рукописи

Зарипов Тимур Шамилевич

**Численное моделирование течений газовзвесей с
заряженными частицами в пористых структурах**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2014

Работа выполнена в Институте Математики и Механики ФГАУ ВПО Казанский (Приволжский) федеральный университет.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук профессор
Егоров Андрей Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук профессор
Осипцов Александр Николаевич, зав. лаб.
механики многофазных сред Института механики МГУ
доктор физико-математических наук профессор
Шатров Анатолий Викторович, зав. каф.
математического моделирования ВятГУ

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения
КазНЦ РАН

Защита состоится 27 ноября 2014 г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.21 при Казанском федеральном университете (420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, корпус 2, ауд. 208).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, д. 35, диссертационный совет Д 212.081.21.

Автореферат разослан 25 сентября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н.

Задворнов О.А.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена численному моделированию течения газозвеси с нейтральными и заряженными частицами в пористых структурах.

Актуальность темы. Течения газозвеси в пористых средах встречаются в различных технических и природных системах, например, устройствах очистки воздуха. Основы теории газовых течений со взвешенными частицами изложены в книгах Н.А. Фукса, Л.М. Левина, С. Соу, Р.И. Нигматулина, В.М. Волощука, Ю.С. Седунова, П. Райста, W.C. Hinds и других. Математические модели движения газа со заряженными частицами описаны в работах А.Б. Ватажина, М.Н. Лившица. Теория конвективно-диффузионного переноса и физико-химических процессов для двухфазных сред изложена в монографиях В.Г. Левича, Ю.П. Гупало. Модели атмосферных аэрозольных процессов даны в книгах Л.С. Ивлева, Ю.А. Довгалюк. Различные аспекты теории многофазных сред освещены в работах Ю.И. Яламова, А.Н. Осипцова, Ю.М. Циркунова, Д.А. Губайдуллина и многих других. Подробные исследования движения газа с взвешенными частицами в пористых средах проведены в работах И.Б. Стечкиной, В.А. Кирша, А.А. Кирша, R.C. Brown и других.

К настоящему времени разработаны математические модели, учитывающие основные физические процессы, сопровождающие течения газозвеси. При этом актуальным остается создание эффективных численных методов моделирования течений газозвеси в пористых структурах, применяемых при фильтрации запыленного воздуха. Улавливание взвешенных частиц в пористых структурах обеспечивается различными механизмами оседания. Для частиц малых размеров основным механизмом является диффузионное оседание, для больших – инерционная и гравитационная импакции. Для обеспечения сепарации частиц переходного диапазона используется предварительная электрическая зарядка, после которой осаждение заряженных частиц достигается за счет электростатических сил. При решении характерных задач электростатического осаждения в воздушных потоках движение заряженных частиц моделируется обычно на основе расчета траекторий отдельных частиц (лагранжев метод) с учетом лишь электростатической индукционной силы. Строго говоря, такой подход оправдан только для одиночного заряда, но модель индукционной силы применяется для потока частиц в предположении, что концентрация частиц достаточно мала, чтобы пренебречь их взаимным кулоновским влиянием. В случае же больших концентраций дисперсной фазы, когда пространственное распределение зарядов можно описать непрерывной функцией, совместно решаются уравнения переноса дисперсной фазы и уравнение для потенциала электрического поля, создаваемого заряженными частицами. Задача определения границ применимо-

сти моделей, учитывающих взаимное влияние зарядов или пренебрегающих им, сохраняет актуальность.

Целью работы являются разработка математических моделей, эффективных методов расчета и проведение параметрических исследований течения газозвеси с нейтральными и заряженными частицами в пористых структурах.

Научная новизна:

1. Предложен и реализован в виде комплекса программ комбинированный метод расчета траекторий взвешенных частиц в гидродинамических полях скоростей, использующий возможности CFD пакетов и параллельных вычислений на основе технологии CUDA.
2. Построена лагранжева модель движения заряженных взвешенных частиц с учетом кулоновского взаимодействия, обобщающая модель одиночной индукционной силы и модель, основанную на предположении о непрерывном распределении электрического заряда в области течения.
3. Построена математическая модель и решена задача о движении электрически заряженных взвешенных частиц в периодической полосе упорядоченной упаковки цилиндров на основе совместного рассмотрения уравнений гидродинамики, переноса взвеси и потенциала электрического поля. Получены зависимости эффективности осаждения дисперсной фазы от числа Пекле и безразмерного параметра, характеризующего влияние электростатической силы.
4. Развита математическая модель и решена задача о движении электрически заряженных взвешенных частиц в периодической упаковке сфер с учетом аэродинамического сопротивления, силы тяжести и электростатической силы. Получены зависимости эффективности осаждения дисперсной фазы от величины заряда частиц и длины упаковки.

Практическая значимость. Разработанные модели, методы и программы могут быть применены для решения практических задач о течениях газозвесей в различных технических системах. Полученные результаты являются теоретической основой для оптимизации устройств очистки запыленного воздуха.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических моделей описываемых процессов и апробированных численных методов их решения, а также сравнением полученных теоретических результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: молодежных научных школах-конференциях «Лобачевские чтения» (Казань, 2007,

2009, 2012 гг.), Седьмом, восьмом и девятом всероссийских семинарах «Сеточные методы для краевых задач и приложений» (Казань, 2007, 2010, 2012 гг.), Восьмой Международной Конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах (НРС-2008)» (Казань, 17–19 ноября 2008 г.), Европейских аэрозольных конференциях ЕАС'2009 (Германия, Карлсруэ, 6–11 сентября 2009 г.) и ЕАС'2012 (Испания, Гранада, 2012 г.), VII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» (Санкт-Петербург, 28 сентября – 1 октября 2010 г.), X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 24–30 августа 2011 г.), XVI International conference on the methods of aerophysical research (Казань, 2012 г.), Девятых Петряновских Чтениях (Москва, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 2013 г.), итоговых научных конференциях сотрудников Казанского университета (Казань, 2007–2014 гг.).

Результаты, представленные в диссертации, поддержаны в рамках выполнения грантов: молодежных научно-инновационных конкурсов «У.М.Н.И.К.» 2009 и 2010 гг. по направлению «Информационные технологии»: «Разработка программного модуля расчета траекторий взвешенных частиц в произвольных гидродинамических полях скоростей», «Разработка пакета программ для расчета дисперсных течений с использованием технологии CUDA и исследование задач аспирации и осаждения»; Молодежного гранта АН РТ (2008 г.) № 05/2-2008 «Решение задач механики с применением многопроцессорных вычислительных систем»; грантов РФФИ (12-01-00333, 14-01-31118); гранта немецкого фонда DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) N 50WM0637 (2008–2009 гг.). Автор выражает благодарность упомянутым фондам и организациям за финансовую поддержку, которая способствовала выполнению работы.

Личный вклад. Автор совместно с научным руководителем принимал участие в постановке математических задач. Автором лично разработан программный комплекс, реализующий предложенный комбинированный метод, осуществлено численное решение задач диссертации и анализ полученных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 13 — в трудах и тезисах конференций.

Содержание работы

Во **введении** приводится обзор научной литературы, посвященной моделированию и экспериментальным исследованиям течений газовзвеси в пористых средах и при обтекании одиночных тел, формулируется цель, ставятся задачи ра-

боты, перечисляются положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы, обосновывается актуальность исследований, изложено краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена описанию математической модели и комбинированной методики расчета ламинарного течения газозвеси. Допущение об отсутствии влияния дисперсной фазы на газовое течение в случае малых концентрация взвешенных частиц является одним из существенных для упрощения математической модели. При таком предположении моделирование двухфазного течения сводится к двум отдельным задачам: задаче гидродинамики и задаче переноса дисперсной фазы. Причем первая задача может быть решена независимо от второй.

Течение несущей фазы описывается системой уравнений Навье—Стокса, включающей в себя уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0, \quad (1)$$

и уравнения сохранения движения

$$\bar{U} \cdot \nabla \bar{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \bar{U}, \quad (2)$$

где \bar{U} – вектор скорости газа, P – давление, ν и ρ – кинематический коэффициент вязкости газа и плотность воздуха.

Уравнения движения взвешенной частицы записываются в виде

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{(\bar{V} - \bar{U})}{\tau} + \bar{g} + \frac{\bar{F}_e}{m_p}, \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{X}_p}{dt} = \bar{V}, \quad (4)$$

где \bar{F}_e – электростатическая сила, действующая на заряженные частицы, \bar{X}_p – радиус-вектор координаты частицы, $\tau = m_p / 3\pi\mu d_p$ – время релаксации частицы, m_p – масса частицы, d_p – диаметр частицы, μ – коэффициент динамической вязкости несущей среды, \bar{g} – вектор силы тяжести. Инерционность частиц характеризуется безразмерным параметром $\gamma = \tau U_0 / L$ – числом Стокса, где U_0 и L – масштабы скорости и длины соответственно.

Одной из целей расчета течений газозвеси является определение интегральных характеристик таких, например, как коэффициент осаждения. Для этого приходится рассчитывать траектории множества взвешенных частиц с различными начальными условиями в пространственно неоднородном поле скоростей газа. Современные CFD пакеты предоставляют широкие возможности расчета поля скоростей течений жидкости и газа для произвольных областей и позволяют рассчитывать траектории взвешенных частиц в найденных полях, однако

имеются сложности с расчетом траекторий вблизи границ, с учетом дополнительных сил, действующих на частицы в гидродинамических полях, а также с эффективным вычислением интегральных характеристик. В связи с этим, в настоящей работе предложен комбинированный метод и разработан программный комплекс для расчета траекторий взвешенных частиц в гидродинамических полях скоростей несущей среды, ориентированный на применение на компьютерах с видеокартой, поддерживающей технологию CUDA. Комплекс содержит функции, отвечающие за считывание поля течения несущей среды, полученного в CFD программе, функции расчета траекторий частиц с возможностью выбора различных сил (броуновская сила, сила тяжести, электростатическая сила и т. п.) и различных численных схем интегрирования, функции поиска ближайших конечных объемов и вычисления составляющих скорости газа в произвольной точке траектории по формулам интерполяции. В разделах 1.2 и 1.3 приводятся использованные методы интегрирования и формулы интерполяции. Общая структура программы и список ключевых программных элементов приведены в разделе 1.4.

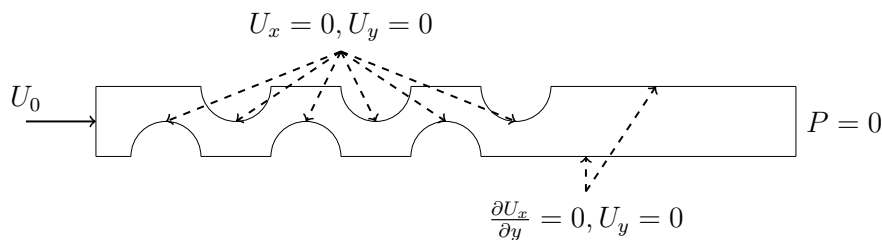


Рис. 1: Расчетная область и граничные условия

В разделе 1.5 описаны расчетные исследования эффективности осаждения E взвешенных частиц в периодической полосе упаковки цилиндров (рис. 1) на основе созданного комплекса программ. Проведены сравнения времени расчета в последовательном и параллельном режимах на компьютере с видеокартой Nvidia Tesla C1060 и процессором Intel Core i7 (рис. 2). Показано, что максимально возможное ускорение вычислений на видеокарте достигает 70-ти и 40 раз по сравнению с однопоточным расчетом на центральном процессоре (CPU) для двух стратегий: расчет в рамках одного вычислительного ядра (GPU1) и поэтапный расчет с использованием функций основного процессора (GPU2).

На рис. 3 представлены два варианта зависимости E от числа Стокса γ для упаковки с пористостью $\alpha = 0.2$: в одном случае частицы рассматривались как материальные точки, в другом – как сферы конечного размера, при этом частицы считались осевшими при касании их границами цилиндров, то есть принимался во внимание эффект зацепления. Видно, что для малых γ разницы между вариантами нет и E монотонно растет с увеличением γ в силу роста

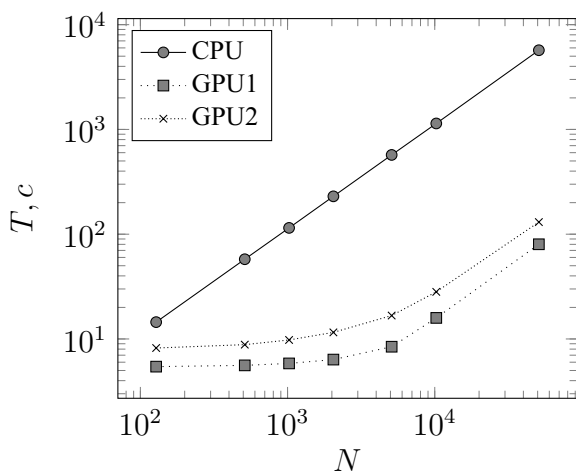


Рис. 2: Время расчета одного варианта как функция числа частиц.

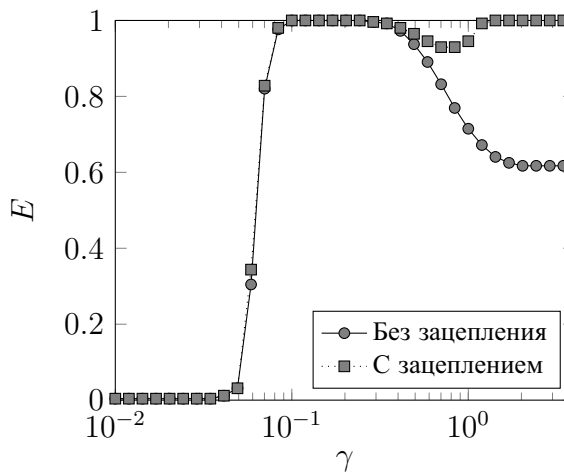


Рис. 3: Эффективность осаждения как функция числа Стокса с и без учета эффекта зацепления частиц

инерционности частиц. Вместе с тем при некотором γ кривая $E(\gamma)$ начинает убывать, поскольку для выбранных значения пористости и направления течения высоко инерционные частицы проходят упаковку насквозь через канал между цилиндрами. Без учета зацепления эффективность осаждения падает до значения, соответствующего отношению высоты канала к высоте входного сечения, с учетом – снова возрастает, т.к. размер начинает оказывать существенное влияние на осаждение частиц.

Вторая глава посвящена постановке и решению задачи о движении заряженных взвешенных частиц внутри сферы, решению задачи об осаждении взвешенных заряженных частиц в плоском канале, а также при обтекании периодического ряда цилиндров.

В разделе 2.1 представлено решение задачи о движении заряженных частиц под действием электростатической индукционной силы и кулоновского взаимодействия между ними внутри заземленной сферы на основе численного интегрирования лагранжевых уравнений для траекторий частиц. В настоящей работе предложена лагранжева модель движения заряженных взвешенных частиц с учетом как кулоновского взаимодействия частиц, так и индукционной силы. Используемый подход позволяет корректно моделировать движение заряженных частиц как при малых, так и больших концентрациях дисперсной фазы. Одним из достоинств этого метода является то, что для постановки задачи достаточно задания начальных условий для движущихся частиц, в то время как при решении задачи в непрерывной постановке могут возникнуть сложности с определением граничных условий для электрического потенциала. Вместе с тем, стоит отметить, что учет кулоновского взаимодействия на каждом шаге по времени при

численном интегрировании уравнений движения частиц предъявляет значительные требования к вычислительным ресурсам.

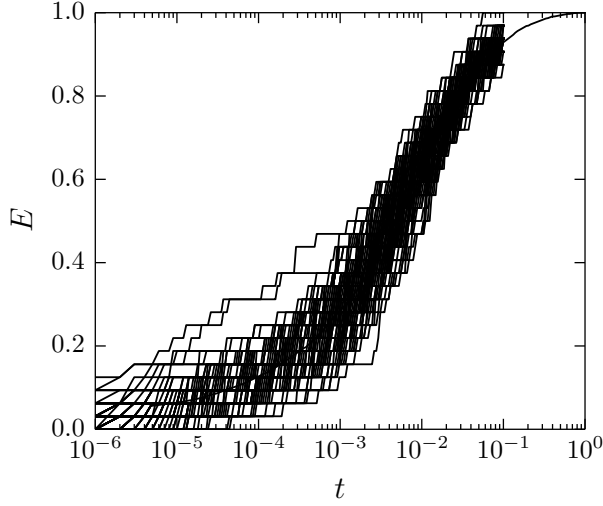
Рассматривается сфера радиуса R_0 , в которой случайно распределены N одноименно заряженных частиц с одинаковым зарядом q . На частицу i действуют кулоновские силы со стороны зарядов всех частиц, распределенных в объеме, а также со стороны индуцированных ими на поверхности сферы зарядов. Тогда уравнение движения i -й частицы может быть записано в виде

$$\frac{d\bar{R}_i}{dT} = B \left(\sum_{j=1(j \neq i)}^N \bar{F}_{ij} + \sum_{j=1(j \neq i)}^N \bar{F}_{ijj} + \bar{F}_{\text{img}} \right), \quad (5)$$

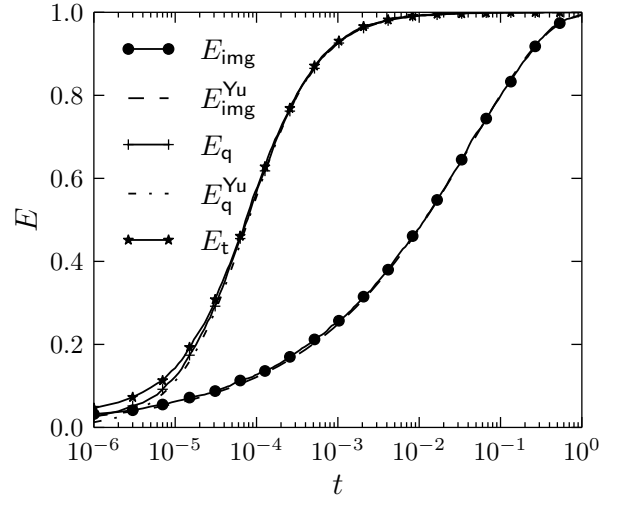
где \bar{R}_i – радиус-вектор, определяющий положение i -й частицы, \bar{F}_{ij} – вектор силы, с которой j -я частица действует на i -ю, \bar{F}_{ijj} – вектор кулоновской силы, с которой образ j -й частицы действует на i -ю, \bar{F}_{img} – индукционная сила, порожденная i -й частицей, $B = (3\pi\mu d)^{-1}$ – подвижность частицы.

Для определения эффективности осаждения частиц E применялся метод статистического моделирования Монте-Карло: на основе многократного расчета траекторий множества частиц с различным начальным распределением внутри сферы строились зависимости $E(t)$, которые затем осреднялись (рис. 4а). Было получено три типа зависимости $E(t)$: E_{img} , E_q , E_t . Функция E_{img} получена с учетом только индукционной силы для одиночной частицы (отброшены первые два слагаемых в правой части (5)). Зависимость $E_q(t)$ – эффективность осаждения с учетом кулоновского взаимодействия между частицами при пренебрежении индукционными силами (отброшены второе и третье слагаемые в (5)). Функция E_t соответствует расчету по полной модели, когда учитываются кулоновское взаимодействие между частицами, индукционная сила для самой частицы и для всех остальных частиц, то есть учтены все слагаемые в уравнениях (5). Для сравнения приведены также теоретические кривые $E_{\text{img}}^{\text{Yu}}(t)$ и $E_q^{\text{Yu}}(t)$, полученные по аналитическим формулам из работы Yu¹. Вклад трех рассматриваемых сил в осаждение частиц зависит от их количества. Приведенные на рис. 4 результаты расчетов демонстрируют это различие. При $N = 4188$ (рис. 4б) влияние индукционной силы на осаждение сказывается в короткий начальный момент времени до $t \sim 10^{-5}$, когда величины E_{img} и E_t оказываются немного выше кривой E_q . При больших временах кривые E_q и E_t практически совпадают, потому что осаждение частиц полностью обеспечивается кулоновским взаимодействием между всеми частицами. С уменьшением N время начального этапа, когда основным механизмом осаждения является действие индукционных сил, увеличивается ($N = 64$, рис. 4в). Кривая E_{img} сближается с E_t , в то время как E_q

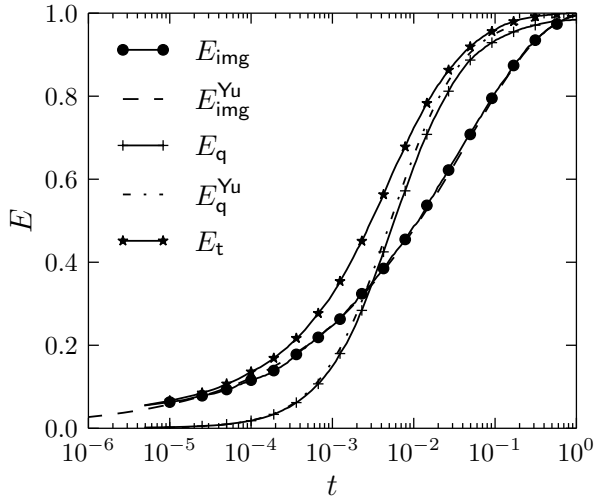
¹Yu C.P. Precipitation of unipolarly charged particles in cylindrical and spherical vessels // Journal of Aerosol Science, 1977. – Vol. 8, no. 4. – P. 237–241.



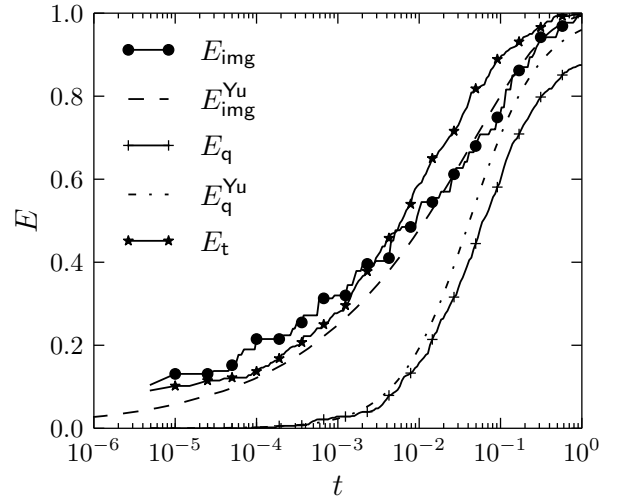
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 4: Зависимость $E(t)$ для различных начальных распределений частиц с фиксированным N (а); зависимость $E(t)$ для $N = 4188$ (б), $N = 64$ (в), $N = 8$ (г).

отделяется от нее. Видно, что существуют интервалы времен, когда E_t оказывается выше как кривой E_{img} , так и E_q . На рис. 4г видно, что для $N = 8$ кривые E_{img} и E_q начинают заметно отличаться от аналитических кривых $E_{img}^{Yu}(t)$ и $E_q^{Yu}(t)$. Точность описания осаждения частиц на основе численной реализации метода Монте-Карло для различных случайных начальных распределений частиц падает для малых N , так как пространственное распределение частиц и электрического заряда, формируемого ими, хуже описывается непрерывной функцией. Рассмотренные значения N для сферы с $R_0 = 500$ мкм (характерный размер ячейки в пористых упаковках аэрозольных фильтров) соответствуют концентрациям частиц n , представленным в таблице 1.

Таблица 1: Концентрация частиц n

N	8	16	32	64	128	418	4188
n, cm^{-3}	$1.53 \cdot 10^4$	$3.06 \cdot 10^4$	$6.11 \cdot 10^4$	$1.22 \cdot 10^5$	$2.44 \cdot 10^5$	$7.98 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$

Раздел 2.2 посвящен эйлеровой модели переноса заряженных взвешенных частиц за счет диффузии, конвекции и под действием электростатических сил. Уравнение переноса для заряженных частиц с учетом влияния электростатической силы в безразмерном виде записывается как

$$\bar{u} \cdot \nabla c - \text{Pe}^{-1} \Delta c - \beta \nabla \cdot (c \nabla \varphi) = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) дополняется уравнением для электрического потенциала φ

$$\Delta \varphi = -c, \quad (7)$$

В уравнениях (6),(7) $\bar{u} = \bar{U}/U_0$, $\text{Pe} = R_c U_0/D$, R_c – характерный размер препятствия, $\varphi = F \varepsilon_0/qC_0$, $c = C/C_0$, $\beta = q^2 C_0 B/R_c U_0 \varepsilon_0$, ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды, q – величина заряда на одной частице, C_0 – характерная концентрация, F – потенциал электрического поля.

В разделе 2.4 приведено решение задачи о движении электрически заряженных взвешенных частиц при обтекании периодического ряда цилиндров. Поле скоростей ламинарного течения газа находится на основе численного решения стационарных уравнений Навье–Стокса (1)-(2) в пакете Fluent. Уравнение (6) решается совместно с (7) в найденном поле скоростей несущей среды с использованием возможностей дополнительных модулей UDF программы Fluent. На рис. 5а-5г приведены результаты расчетов изолиний концентраций c частиц и потенциала φ электрического поля для $\varepsilon = 0.99$, $\text{Re} = 0.034$, $\beta = 0.001$ и различных чисел Пекле Pe . При малых числах Пекле интенсивное диффузионное оседание приводит к значительному снижению концентрации позади цилиндра с равномерным распределением её по высоте периодического элемента. Распределение потенциала электрического поля обусловлено неоднородным пространственным распределением заряженных частиц. Существенная асимметрия распределения φ для $\text{Pe} = 0.1$ связана со значительным падением концентрации частиц в полосе за цилиндром. С увеличением числа Пекле зона влияния диффузионного оседания уменьшается, и для $\text{Pe} = 1$ заметное падение концентрации частиц наблюдается лишь в окрестности цилиндра и небольшом следе позади него.

Зависимости коэффициента η захвата частиц отдельным цилиндром от числа Пекле приведены на рис. 6. При значениях радиуса цилиндра $R_f = 50 \text{ мкм}$ и начальной скорости течения $U_0 = 0.01 \text{ м/с}$ диапазон изменения значений числа Пекле $\text{Pe} = 1.7 \div 740$ соответствует изменению размера частиц в диапазоне

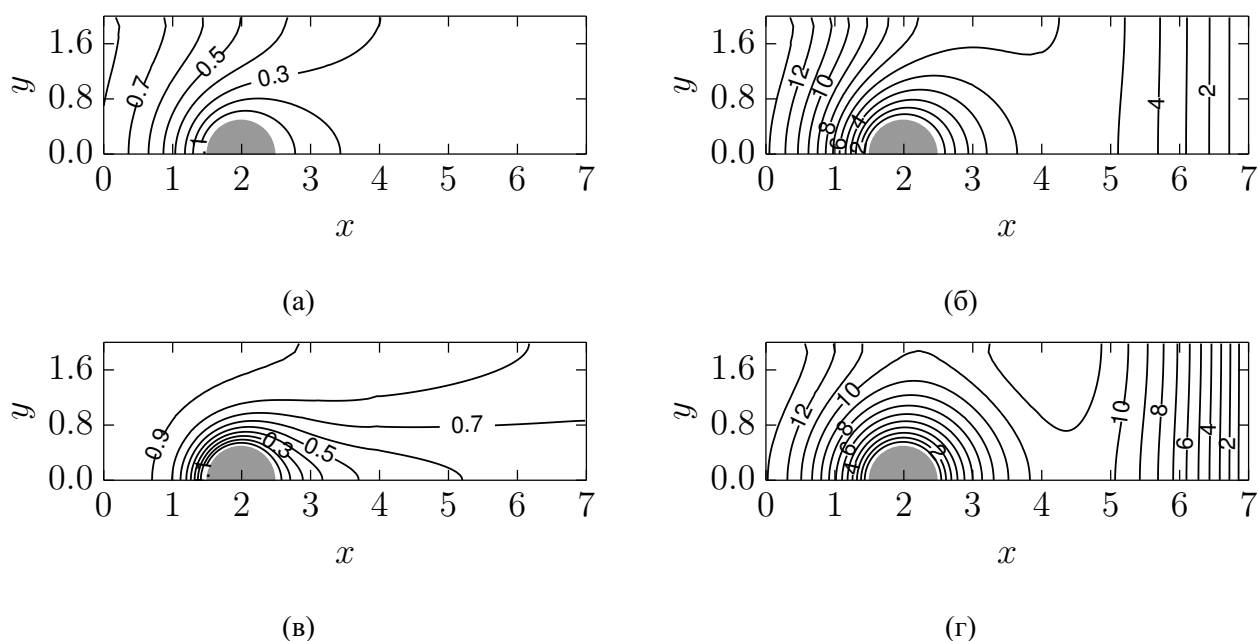


Рис. 5: Распределение концентрации c частиц и изолинии потенциала φ электрического поля при $Pe = 0.1$ (а, в), $Pe = 1$ (б, г).

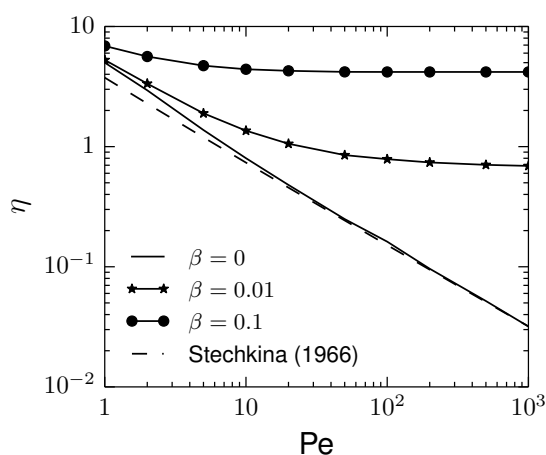


Рис. 6: Зависимость эффективности захвата одиночного цилиндра от Pe при различных значениях β .

$d = 0.003 \div 0.1 \mu\text{м}$. Штриховая кривая соответствует известной приближенной формуле Стечкиной². Расчеты в отсутствие заряда на частицах дают очень близкие кривые $\eta(Pe)$. Для заряженных частиц кривые $\eta(Pe)$ с ростом Pe стремятся к постоянным значениям, определяемым величиной β . Таким образом, выбор параметра β позволяет добиться высокой эффективности осаждения в отсутствие диффузионного механизма.

В третьей главе приведено исследование движения газовой взвеси в упаковке сфер. Рассматривается задача о течении газа в трехмерном периодическом

²Stechkina I.B., Fuchs N.A. Studies on Fibrous Aerosol Filters—I. Calculation of Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters // Annals of Occupational Hygiene, 1966. – Vol. 9, no. 2. – P. 59–64.

элементе пористой структуры, составленном из плотной упаковки сфер одинакового диаметра с центрами в узлах упорядоченной упаковки. Скорости течения газа внутри пористой структуры достаточно малы, чтобы можно было пренебречь сжимаемостью газа. Ламинарное течение газа описывается трехмерными стационарными уравнениями Навье—Стокса. Течение газовой фазы рассчитывалось в пакете Fluent в режиме параллельных вычислений. На основе расчетов траекторий частиц в полученном поле скоростей с учетом аэродинамического сопротивления, силы тяжести и электростатической силы проведены исследования эффективности осаждения частиц при различной скорости течения. Сравнение с экспериментальными данными показало качественное согласие. Инерционный и гравитационный механизмы осаждения обеспечивают улавливание взвешенных частиц на нескольких первых сферах. Осаждение под действием электростатической силы по характеру отличается от указанных механизмов. Даже при слабой заряженности частиц, их движение к поверхностям будет продолжаться до края слоя сфер. Полное осаждение заряженных частиц можно обеспечить увеличением числа зарядов частицы или длины пористого слоя.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Предложен комбинированный метод и создан программный модуль расчета траекторий взвешенных частиц в гидродинамических полях скоростей, который использует возможности CFD пакетов и реализует параллельные вычисления на компьютере с видеокартой, допускающей применение технологии CUDA. Для задачи о течении газовой взвеси в упаковке цилиндров достигнуто ускорение расчетов траекторий частиц до 70 раз на рабочей станции Tesla C1060. Показано, что в упорядоченной упаковке цилиндров зависимость эффективности инерционного осаждения от числа Стокса может носить немонотонный характер.
2. Развита лагранжева модель движения заряженных взвешенных частиц с учетом кулоновского взаимодействия внутри заземленной сферы, обобщающая модель одиночной индукционной силы и модель, основанную на предположении о непрерывном распределении электрического заряда в области течения. Показано, что в области больших концентраций частиц эффективность осаждения определяется кулоновским взаимодействием частиц, влияние индукционного осаждения сказывается лишь на малых начальных временах. В области малых концентраций частиц в объеме эффективность осаждения удовлетворительно описывается в рамках модели одиночной индукционной силы. В области промежуточных концентраций частиц оба механизма заметно сказываются на эффективности осаждения. При этом эф-

фективность осаждения, найденная по обобщенной модели с учетом обоих механизмов, оказывается выше значений, полученных с учетом только одного из механизмов.

3. Решена задача о движении электрически заряженных взвешенных частиц в периодической полосе упорядоченной упаковки цилиндров на основе совместного рассмотрения уравнений гидродинамики, переноса взвеси и потенциала электрического поля. Проведены параметрические исследования эффективности осаждения частиц при различных числах Пекле и значениях параметра, характеризующего влияние электростатической силы. Показано, что наличие даже небольшого числа зарядов на частицах приводит к заметному росту эффективности осаждения.
4. Решена задача о движении заряженных взвешенных частиц в периодической упаковке сфер с учетом аэродинамического сопротивления, силы тяжести и электростатической силы. Проведены параметрические исследования эффективности осаждения заряженных взвешенных частиц, получено качественное согласие с экспериментальными данными. Показано, что в отличие от инерционного и гравитационного механизмов, приводящих к улавливанию частиц в начальных слоях упаковки движение заряженных взвешенных частиц к поверхностям элементов упаковки будет продолжаться до края слоя сфер. Полное осаждение заряженных частиц в глубокой упаковке может быть обеспечено увеличением числа зарядов частицы или длины пористого слоя.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Зарипов Т.Ш. Осаждение заряженных аэрозольных частиц под действием электрических сил // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. — 2013. — Т. 155, № 3. — С. 53–62.
2. Зарипов Т.Ш. Моделирование осаждения заряженных частиц при обтекании периодического ряда цилиндров // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. — 2012. — Т. 154, № 1. — С. 114–121.
3. Зарипов Т.Ш., Егоров А.Г., Демидов Д.Е. Движение заряженных аэрозольных частиц в упаковке цилиндров // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — Т. 4, № 3. — С. 786–788.

4. Гильфанов А.К., Зарипов Т.Ш. Возможности параллельных вычислений при решении задач газовой динамики в среде CFD программы FLUENT // Известия вузов. Авиационная техника. — 2009. — Т. 1. — С. 1–4.

В других изданиях

5. Гильфанов А.К., Зарипов Т.Ш. Возможности параллельных вычислений при решении трехмерной задачи гидродинамики с помощью CFD программы Fluent // Материалы Шестой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2007». — Т. 36. — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2007. — С. 57–59.
6. Егоров А.Г., Зарипов Т.Ш. Исследование гидродинамики течений в пористых средах на основе решения уравнения Навье-Стокса // Материалы Шестой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2007». — Т. 36. — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2007. — С. 70–71.
7. Гильфанов А.К., Зарипов Т.Ш. Решение трехмерных задач гидродинамики в среде программы FLUENT в режиме распараллеливания вычислений // 8-я Международная Конференция Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах (НПС-2008). — Казань: Изд. КГТУ, 2008. — С. 136–138.
8. Зарипов Т.Ш. Осаждение аэрозольных частиц в упаковке шаров // 8-я Международная Конференция Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах (НПС-2008). — Казань: Изд. КГТУ, 2008. — С. 154.
9. Zaripov T.Sh., Hollander. Deposition of aerosol particles in dense array of spheres // European Aerosol Conference. — Karlsruhe, 2009. — 1 p. — Digital Abstracts Book : T077A13.
10. Зарипов Т.Ш. Применение технологии CUDA при расчете теплового поля в глубинном слое // Материалы Восьмой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2009». — Т. 39. — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2009. — С. 223–225.

11. Егоров А.Г., Зарипов Т.Ш., Демидов Д.Е. Движение заряженных аэрозольных частиц в упаковке цилиндров // Труды Восьмой Всероссийской конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения». — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2010. — С. 200–203.
12. Зарипов Т.Ш., Егоров А.Г. Моделирование движения заряженных аэрозольных частиц в упаковке цилиндров // Тезисы докладов VII-й Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли – 2010». — Санкт-Петербург, 2010. — С. 34.
13. Zaripov T.Sh., Egorov A.G. Deposition efficiency of charged aerosol particles in cylinder array // XVI International conference on the methods of aerophysical research. — Vol. 1. — Kazan, 2012. — P. 266–267.
14. Зарипов Т.Ш. Расчет осаждения заряженных аэрозольных частиц с учетом кулоновской силы // Труды IX Всероссийской конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения». — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2012. — С. 163–167.
15. Зарипов Т.Ш. Эффективность осаждения заряженных аэрозольных частиц в замкнутом объеме // Материалы молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2012». — Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского государственного университета, 2012. — С. 68–70.
16. Zaripov T.Sh., Egorov A.G. Deposition efficiency of charged aerosol particles in cylinder array // European Aerosol Conference, EAC-2012. — Granada, 2012. — 1 p. — Digital Abstracts Book : C-WG10S1P20.
17. Зарипов Т.Ш. Численное исследование осаждения заряженных аэрозольных частиц с учетом кулоновской силы // Тезисы докладов конференции «Девятые Петряновские чтения». — Москва, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 2013. — С. 40–41.